

07
объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

937 / 2-81

23/11-81

P14-80-715

Г.И.Доливо-Добровольская, В.Д.Коломенский
В.П.Перельгин, С.Г.Стеценко

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРЕКОВ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР
И ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ
В ПРИРОДНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Направлено в "Минералогический журнал"

1980

Как впервые было показано в работах Юнга^{/1/}, а также Силка и Барнеса^{/2/}, природные и синтетические ионные и ковалентные кристаллы обладают способностью регистрировать и сохранять микроскопические дефекты структуры, создаваемые в них при прохождении тяжелых заряженных частиц. Это свойство кристаллов находит обширные и разнообразные применения во многих областях науки и техники. В качестве одного из интересных направлений исследований можно указать исследования зарядового состава и энергетического спектра тяжелых космических ядер, впервые предпринятые еще в 1964 году Мореттом, Пелласом и Уокером^{/3/}. Как показано в этой работе, кристаллические детекторы способны регистрировать треки от остановок космических ядер с $Z \geq 20$ и сохранять такие треки в течение многих миллионов лет. Треки в кристаллах выявляются обычно методом избирательного химического травления^{/4/}. Большая значимость, высокая эффективность этого направления исследований тяжелой компоненты космических лучей хорошо иллюстрируется, например, работой Флейшера и др., впервые обнаруживших в 1967 году^{/5/} ядра с $Z \geq 30$ в составе галактических космических лучей путем идентификации протяженных треков в пироксенах метеорита Эстервилл. Дальнейшие исследования треков в минералах внеземного происхождения имели целью определение зарядового спектра тяжелых космических ядер, а также возможных вариаций состава и активности первичного космического излучения за миллионы и десятки миллионов лет. В работах^{/6,7/} приведены полуэмпирические зависимости травимых длин треков от атомного номера Z ядер в области $20 \div 92$.

Несмотря на очевидные преимущества исследования треков ядер в кристаллах внеземного происхождения, вплоть до 1973 года было выполнено лишь несколько экспериментальных работ с такими кристаллами.

Авторы работы^{/7/}, исследовавшие кристаллы гиперстена из метеорита Джонстаун, обнаружили трек длиной около 1 мм, который они отнесли к области атомных номеров $Z \geq 82$.

Треки длиной 0,9 и 1,0 мм, обнаруженные в кристаллах лунного пижонита^{/8/}, также были отнесены к области $Z \geq 82$. Исследования пироксенов и оливинов из метеорита Патвар, в котором сохранились участки, расположенные вблизи доатмосферной поверхности, не привели к обнаружению треков длиннее 500 мкм.

Систематические исследования треков в оливинах из палласитов, предпринятые в ОИЯИ с 1974 года /9-12/, показали, что идентификация треков тяжелых космических ядер часто должна производиться в условиях фона фигур травления линейных дефектов структуры в этих кристаллах - капиллярных включений, дислокаций.

Выявляемые избирательным химическим травлением дефекты структуры могут быть как первичными /ростовыми/, так и вторичными, возникшими при механических и термических воздействиях на кристалл, и относиться к различным типам дефектов - точечным, линейным, плоскостным, объемным.

Правильная периодичность структуры кристаллов определяет и упорядоченное распределение многих видов дефектов и несовершенств /13/.

Известно, что многие типы структурных дефектов подчиняются классу симметрии данного кристалла, а их ориентировка в объеме кристалла /в частности, линейных и плоскостных дефектов/ подчиняется направлениям и плоскостям с малыми индексами.

При исследовании разнообразных первичных и вторичных дефектов структуры в природных и искусственных кристаллах, применяемых в качестве трековых детекторов ядерного излучения /ионные и ковалентные кристаллы/, возникла необходимость использования современных методов оптической микроскопии: кристаллооптические исследования иммерсионных препаратов, фазово-контрастная микроскопия, поляризационный контраст, двухлучевая и многолучевая интерферометрия. Применялась кристаллооптическая методика изучения следов ядерных излучений, цель которой состояла в дискриминации треков ядерных излучений от дефектов структуры, присутствующих изучаемому минералу /14/.

При детальном исследовании кристаллического вещества невозможно обойтись без определения его основных направлений, которое позволяет затем более полно интерпретировать то или иное изучаемое свойство кристалла. В настоящее время, когда исследование кристаллов с помощью рентгеновских лучей завоевало прочные позиции в физике, принято считать, что определение основных направлений в кристалле /его установка/ может производиться лишь с помощью рентгенометрии. Однако исследование кристаллов, как пропускающих, так и отражающих в видимом диапазоне длин волн электромагнитные излучения, приводит к не менее точным результатам, а техника исследования на оптическом микроскопе более проста и доступна, чем рентгенометрические исследования.

Поворотный столик оптического микроскопа, снабженный лимбом с нониусом, позволяет производить измерения с точностью до $1/2^\circ$. В проходящем поляризованном свете прозрачные кристаллы 27 точечных классов /исключая 5 точечных классов кубической

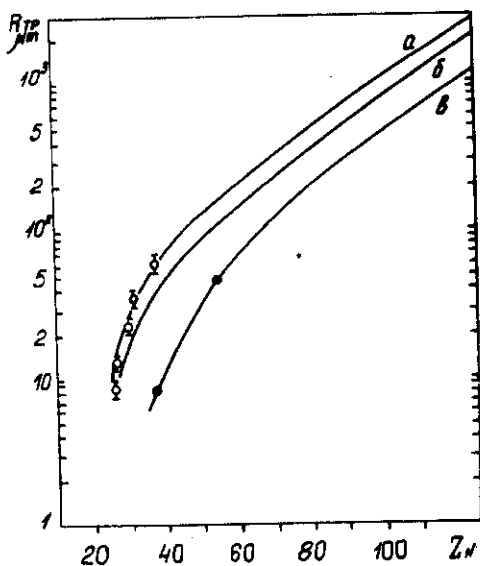


Рис. 1. Травимая длина треков ядер в кристаллах оливина в зависимости от заряда ядра:
 а/ в неотожженных кристаллах;
 б/ с учетом отжига в космическом пространстве;
 в/ с учетом дополнительного отжига.

геометрической ориентировки других видов дефектов. Например, в шлифах или иммерсионных препаратах флюорита хорошо заметны трещинки спайности вдоль $\langle 110 \rangle$. Очертания фигур травления на $\{111\}$ или $\{001\}$ флюорита также соответствуют направлениям $\langle 110 \rangle$.

Значение символов основных направлений позволяет проводить геометрическую идентификацию всех имеющихся протяженных дефектов /линейных и плоскостных/.

Рассмотрим более детально, что представляют собой треки тяжелых заряженных частиц и дефекты структуры в кристаллах оливина из метеоритов. Треки тяжелых заряженных частиц ориентированы в относительно широком интервале углов; их длина, как следует из рис. 1, пропорциональна атомному номеру Z частицы /18/.

Однако и фигуры травления капиллярных включений имеют линейную форму и могут достигать десятков и сотен мкм. Поэтому

системы/ обнаруживают эффекты погасания и просветления, положение которых соответствует ориентировке их оптической индикатрисы относительно поляризатора и анализатора /15/. Установив положение погасания, мы тем самым получаем ориентацию оптических осей кристалла. Зная класс симметрии кристалла, легко определить символы направлений, являющихся оптическими осями /18/.

Для кристаллов кубических классов симметрии, которые являются оптически изотропными, установление главных кристаллографических направлений может быть произведено с помощью фигур травления, трещин спайности или других морфологических признаков, направление которых легко определить из справочной литературы /17/.

Такие направления служат привязкой для нахождения

их дискриминация от треков космических ядер представляет собой сложную проблему, не только для оливинов, но и для других внеземных кристаллов - пироксенов, фосфатов, полевых шпатов.

В основу методики дискриминации треков от собственных дефектов структуры кристалла может быть положено характерное свойство всех протяженных несовершенств структуры: строго ориентированное положение их в объеме кристалла, согласующееся с главными геометрическими направлениями, присущими данному классу симметрии. Отсюда следует, что задача дискриминации фигур травления капиллярных включений может быть решена, если в каждом исследуемом кристалле будут идентифицированы главные кристаллографические направления, а также установлена пространственная ориентация систем капиллярных включений.

Для исследования капиллярных систем размером менее 0,2 мкм в сечении кристаллы предварительно нагреваются до температуры, при которой отжигаются микродефекты структуры, создаваемые тяжелыми ядрами первичного космического излучения.

Эта температура соответствует 380-390 °С для фосфатов, 480-490 °С для оливинов, 650 °С для пироксенов, 750-800 °С для полевых шпатов. Затем исследуемые кристаллы подвергают травлению в соответствующих травителях. Апатиты, витлокиты обрабатывают в слабых растворах азотной кислоты /4/, либо в травителе $WH^{19/}$ при 100 °С в течение 8-15 ч. Оливины травят в травителе WH , модифицированном для оптимального выявления протяженных дефектов структуры этих кристаллов /16/.

Травление пироксенов, полевых шпатов осуществляют в концентрированных растворах едкого натра с концентрацией от 40 до 60% при температурах от 140 °С и выше /4/.

При этом в протравленных кристаллах выявляются фигуры травления, обусловленные капиллярными дефектами и дислокациями /рис. 2/.

И капиллярные включения, и дислокации относятся к категории линейных дефектов структуры. Капиллярные включения в том виде, в каком они обнаруживаются в оливине из метеоритов, представляют собой обычно заполненные включения полные каналы, возникшие, по-видимому, как результат очень длительного "отжига" линейных дефектов /либо ростовых дислокаций, либо цепочек из точечных дефектов/, окруженных примесными атмосферами. Подобные явления неоднократно обнаруживались в кристаллах самых различных веществ /20/.

Именно поэтому "отожженные" линейные дефекты - капиллярные включения и "состаренные" дислокации занимают стабильное и строго упорядоченное положение в объеме кристалла.

По результатам измерений в лабораторной системе координат составляется карта направлений дефектов структуры на какую-либо плоскость с малыми индексами. Затем полученная карта сравнивается с картами стереографических проекций основных

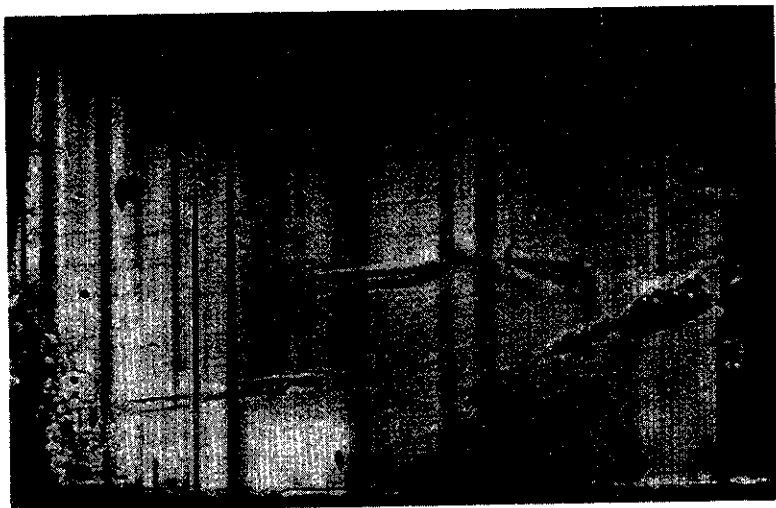


Рис. 2. Фигуры травления капиллярных дефектов и дислокаций в кристаллах оливина.

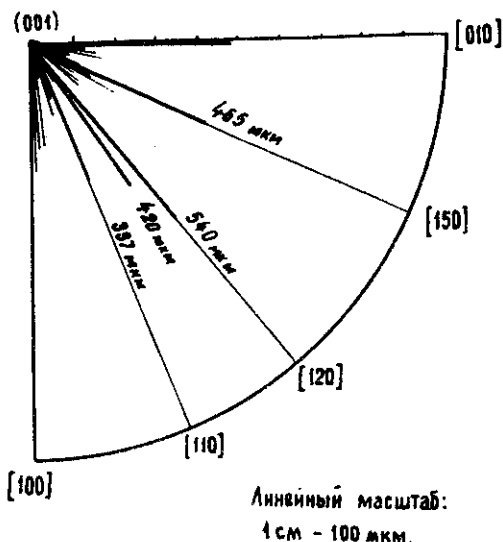


Рис. 3. Стереографические проекции линейных дефектов в кристалле оливина на плоскость, перпендикулярную направлению /001/.

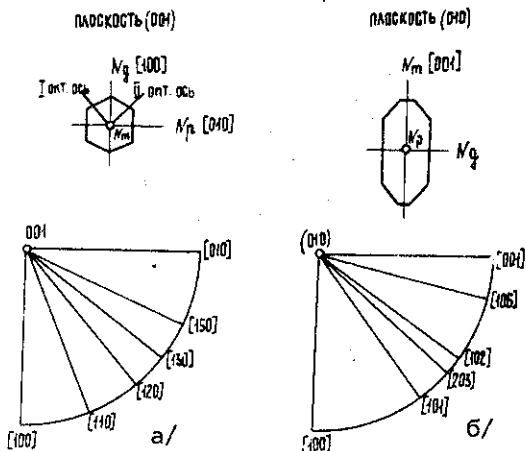


Рис. 4. Стереографические проекции основных направлений кристалла оливина: а/ на плоскость 001; б/ на плоскость /010/.

направлений, составляемых для исследуемого кристалла. По совпадению полученной в результате такого исследования карты направлений дефектов структуры и карт стереографических проекций определяется кристаллографическое направление дефекта /системы параллельных дефектов/. Таким же образом определяются и остальные кристаллографические направления.

Такая процедура позволяет получить информацию об ориентации относительно кристаллографических направлений для каждого исследуемого кристалла дефектов структуры /макроскопических или выявляемых методами избирательного химического травления/. Измерение пространственного ориентирования фигур травления протяженных дефектов структуры позволяет, с учетом карт стереографических проекций, сделать однозначное заключение о природе наблюдаемых дефектов. Осуществление такой процедуры является необходимым условием однозначной идентификации треков космических ядер от Z-80

вплоть до миллиметровых треков от гипотетических сверхтяжелых нуклидов в условиях фона от дефектов структуры исследуемого кристалла. В качестве примера использования этой методики приведем определение кристаллографических направлений в образце оливина из метеорита Марьялахти.

На рис. 3 приведена стереографическая проекция направлений различного рода линейных дефектов, замеренных в шлифе оливина по плоскости /001/.

На рис. 4 приведены карты стереографических проекций основных направлений кристалла оливина: рис. 4а представляет стереографическую проекцию на плоскость /001/, рис. 4б - стереографическую проекцию на плоскость /010/.

Совмещая полученные микрофотографированием или геометрическим измерением картины распределения дефектов структуры оливина, можно однозначно определить реальные кристаллографические направления для исследуемых дефектов данного кристалла. В приведенном на рис. 3 примере ориентировка наиболее протяженных линейных дефектов оказалась параллельной направлениям [010], [150], [120], и [110], за исключением одного дефекта длиной 420 мкм.

Отсюда можно заключить, что дефекты, ориентированные вдоль направлений с малыми индексами, относятся к собственно структурным дефектам оливина, а случайно ориентированный дефект длиной 50-100 мкм, а также дефект в 420 мкм представляют собой треки заряженных частиц.

Сравнение стереографических проекций линейных дефектов со стандартными картами основных кристаллографических направлений данного класса кристалла позволяет проводить однозначную идентификацию протравленных треков ядер с $Z \geq 50$, вплоть до треков ядер с $Z \geq 90$.

Аналогичные исследования могут быть выполнены для других кристаллов внеземного происхождения, в которых регистрируются следы от остановок тяжелых космических ядер.

Указанная методика является необходимым этапом исследований по поиску следов от остановок ядер гипотетических сверхтяжелых элементов, которые могут синтезироваться в грандиозных взрывообразных процессах, непрерывно происходящих в галактических объектах.

В заключение авторы выражают глубокую признательность за постоянное внимание к этим исследованиям академику Г.Н.Флерову.

ЛИТЕРАТУРА

1. Young D.A. Etching of Radiation Damage in Lithium Fluorid, *Nature*, 1958, 182, p. 375-377.
2. Siik E.C., Barnes R.S. Examination of Fission Fragment Track with an Ekelectron Microscope, *Phil.Mag.*, 1959, 4, p. 970-971.
3. Maurette M., Pellas P., Walker R.M. Cosmic Ray Induced Particle Tracts in a Meteorite, *Nature*, 1964, 204, p. 821-823.
4. Fleischer R.L., Price P.B., Walker R.M. Nuclear Tracks in Solids, University of California Press, Berkeley, California, 1975.
5. Fleischer R.L. et al. Origins of Fossil Charged Particle Tracks in Meteorites, *J.Geophys.Res.*, 1967, 72, p. 333-353.
6. Price P.B., Rajan R.S., Tamhane A.S. The Abundance of Nuclei Heavier than Iron in the Cosmic Radiation in the Geological Past. *Astrophys. J.*, 1968, 151, p. L109-116.
7. Maurette M. et al. Fossil Tracks in Meteorites and the Chemical Abundance and Energy Spectrum of Extremely Heavy Cosmic Rays, *Int.Atomic Agency Symposium on Meteorite Reseach*, Vienna, *Meteorite Res.*, P.Millman (ed), 286-315, Dordrecht, Holland, D.Reidel, 1969.
8. Price P.B., Rajan R.S., Shirk E.K. Ultra-Heavy Cosmic Rays in the Moon, *Proc.Second Lunar Sci.Conf.*, 3, p. 2621-2627, Cambrige, MIT Press, 1971.
9. Отгонсурен О., Перелыгин В.П. Об идентификации следов тяжелых ядер первичного косм.изл.в минералах из метеоритов.
10. Flerov G.N. et al. On Search for Tracks of Heavy and Superheavy Cosmic-Ray Nuclei in Crystals from Pallasites, *Geoch. Cosmoch. Acta*, 1976, 40, p. 305-307.
11. Otgonsuren O. et al. Abundances of 52 Nuclei in Galactic Cosmic Rays: Long-Term Averages Based on Studies of Pallasites, *Astroph.J.*, 1976, 210, p. 258-266.
12. Лхагвасурен Д. и др. Усредненные по времени распространенности галактических космических ядер в области атомных номеров $Z > 50$, *Изв.АН СССР, сер.физ.*, 1979, 43, p.862-871.
13. Мокиевский В.А., Доливо-Добровольская Г.И. Упорядоченные скопления точечных дефектов в кристаллах. Записки Всесоюзн. минералогического общества, 1979, 108, в. 6, с. 705-709.
14. Доливо-Добровольская Г.И. и др. Дефекты структуры в кристаллах оливина из палласитов. *ОИЯИ, P13-9543*, Дубна, 1976.
15. Татарский В.Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод. Недра, М., 1965.

16. Доливо-Добровольская Г.И. и др. Треки тяжелых космических ядер и дефекты структуры в кристаллах оливина из палласитов. Геохимия, 1976, № 10, с. 1476-1484.
17. Винчелл А.Н. Оптическая минералогия, ИЛ, 1949.
18. Katz R., Kobetich E.J. Formation of Etchable Tracks in Dielectrics, Phys.Rev., 1968, 170, p. 401-405.
19. Krishnaswami S. et al. Olivines: Revelation of Tracks of Charged Particles, Science, 1971, 174, p. 287-291.
20. Stokes R. Thermal-Mechanical History and Stength of Magneium Oxide Single Crystals. J.Am.Germ.Soc., 1966, 49, p. 39-46.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 ноября 1980 года.